# 问题记录

2014.7

* 采用欧拉角量测比四元数量测的航向角精度明显高？这个是为神马？相应的位置误差不见减小，赶脚奇怪。
* 2014.9.2 一直默认采用IMU漂移为0，不如改变会怎样？记得尝试。

## 视觉

* 当初始姿态未知时的导航问题：独立进行视觉导航时，初始姿态可否任意设置，是否会导致计算误差。（即视觉导航的初始对准问题）
* 双目是基于左右相机的视差解算距离的，因此，可以从视差相对大小出发进行三维重建误差分析。在进行三维重建时剔除视差太小的点，即太远的点，或许可以提高导航精度。
* ？视觉导航的精度指标应该采用“最大误差/总行程”还是“终点误差/总行程”
* 特征点匹配：sift特征点匹配的参数：MatchTwoImage函数中的“distRatio = 0.6; % 这个参数用于控制匹配的准确度吧？具体意义是多少？取多少合适”
* Kitti的数据提取中按照位置和安装角还未从标定文件中提取。

## 惯导

* 搞清楚一个很重要的问题：平台误差角是从惯导转到计算机还是计算机转到惯导参考系。我初步推断，大家用的是从计算系转到真实参考系。姿态角定义是从参考系转到本体系，计算中是从计算系转到本体系。

师姐原程序中是：姿态误差角直接解算得到Crc，表示从参考系转到计算机系

* 姿态修正问题，师姐的原姿态修正公式：Crb = Crc' \* Crb;。我的：Crb=Crb\*Crc。

## 组合

* 组合时，R,T,以及各种误差的正负问题，补偿时的加减问题，让我搞得很头疼
* 状态方程得自己推一遍，弄清楚每个误差是谁减谁
* 相对位置误差指标的定义问题还没弄清，且和老师意见不一致，找文献确认！我认为应该取整个过程中最大的误差与路程累积行走总长度相除。另外弄清楚应该取各个轴的误差还是合并。
* 如何理解增广的思想：将上一时刻姿态和位置误差的变化率设为0。
* 调试的时候为了观察状态修正的效果，需要给定状态的真值。当前时刻姿态误差角的真值=当前未更新的解算姿态角-真实姿态角。那么问题是：上一时刻姿态误差角的真实值=？是否可以理解为：上一时刻姿态误差角的真实值=0
* 7.29 以相对运动参数误差为量测的组合导航方法的重大问题：

以为前提。导致量测量中包含了前一时刻的位置及姿态导航误差，但量测方程中并不考虑这个误差，当这个因素在量测量的误差中占比重过大时将使得量测方程无法描述量测量，从而导致滤波发散。这个问题是这类组合组合导航方法的一个痛点。

以相对运动参数为量测的组合导航方法也存在同样的问题，量测方程描述相对运动时同样作了该近似处理。

这个问题在某些情况下表现得比较严重：…

猜想解决办法：

1. 寻找与之前导航结果关系更弱的量测量：a)用速度作量测…

* 怎样的情况组合效果好：

1. 视觉的位置精度低一点：采样间隔长一点，安装/双目外参误差大一点，轨迹的姿态变化多一点（多一些转弯，斜坡）
2. 惯导的姿态精度高一点：陀螺精度高一点
3. 发现组合对视觉姿态精度的提高一般是明显的，但是对位置的提高在视觉位置精度高时却不是那么有效。原因应该是视觉姿态的误差还比较小时没有导致位置的发散。因此，INS/VNS组合提高位置精度最有效的途径就是通过减小视觉导航位置误差中由于姿态误差导致的部分。如果这部分比较小的话，通过INS/VNS提高位置精度就比较困难了，除非能把视觉的常值误差估计出来，但这个感觉真是比较困难。

### 组合导航初始对准问题

用真实IMU数据时要求进行初始对准

## Kitti

### 6.6日程序遗留问题：

（1）get\_Calib\_kitti 未考虑左相机的位置和姿态误差

（2）raw\_data中 extrat 图片的焦距是 [984.2,980.8]，syn&rect图片的焦距怎么变成了[721.5,721.5]，为什么矫正图片焦距会变小？

（3）认为矫正后图片畸变为0的处理是否合适？

（4）匹配成功特征点的视差检查有多重要？阈值取多少合适？

（5）一直没有可考虑相机和IMU之间的距离问题，如果考虑的话应该怎样？

~~（6）图片采样时间不是正好10HZ的问题，需要更改程序。~~

（7）当地重力加速度木有更新

### 8.4

Om到底应该怎么计算？

关于rodrigues函数有大问题。

### 8.31

* 发现之前的一个错误：kitti数据trueTrace中的initialAttitude\_r用错了单位°，应该用rad。
* 重大发现：捷联惯导积分中对于X(T+dT)=X(T)+dX\*dT的处理很有讲究，dT用T时刻的、T+dT时刻的效果很不一样，正在寻找一个更好的方法。试过几种插值方法之后，发现还是用后一时刻IMU数据的效果好，费解！想换成用100HZ的数据以减少这一点的影响，但是发现100HZ的IMU数据时间步长都能成负的，暂时放弃。

## 重大勘误

* 7.17改了dQTb法的四元数转换因子

从改为

理论实验均已验证。

如果没有错误的话（暂不敢保证，未细看），那篇文献也是错的

* 姿态角误差定义出错





# 定义标准

## 误差定义

我的误差定义统一如下（14.7.18补）

1. 统一采用c->n的误差定义形式

认为误差来自于转动前的基准，且在“转动前的坐标系”（导航中为导航系）下表达。







惯导中的平台误差角采用的是这种定义：

1. 平台误差角误差方程为：，在导航系下表达
2. 平台误差角的物理意义是反映当前姿态的误差，而惯导的姿态解算是不断迭代的，，比影响大很多…
3. 另一种误差定义形式b->a

认为误差来自于当前的转动，且在“转动后的坐标系”（导航中为本体系）下表达。





（3）两种误差定义形式的关系：c->n和b->a

****

毫无疑问：，那到底有多大的区别？（待解）





# 捷联惯导

## 捷联惯导解算原理



图 1

## 比力方程

### 比力信息

加速度计直接测量得到的物理量称为比力f。比力是非引力场加速度，这个引力加速度包括由地球自转引起的非惯性加速度。

根据加计的物理特性，由于加计本身同载体一同受到引力场的影响，因此加计的输出数据包含了引力的作用，被称为有害加速度。因此由于加计的测量原理中不对引力的大小进行测量，单独凭借加计信息无法排除引力的影响。现行的办法是建立引力场模型使引力加速度称为已知信息。

比力矢量可表达为：



在地球上G由重力加速度g和离心加速度两部分组合而成。重力加速度g是切实存在的万有引力与重力的比值。离心加速度没有对应的真实力，是为了对力不平衡的载体建立力平衡方程时引入的惯性力与质量的比值。

### 比力方程的推导

**清除几个概念**

* 1. 位置，速度，加速度都是通过矢量描述的；
  2. 矢量都相对描述的，表达时将矢量的起点平移到坐标系原点。位置、速度、加速度相对于“谁”即指这个矢量的原点是“谁”的。位置相对于地球则意味着位置矢量是从地球质心指向载体质心。由于速度和加速度空间是由位置空间衍生的，要求衍生的过程中使用的原点始终不变。相对于地球的加速度要求首先速度描述的原点是地球质心，且求导过程中使用的原点也都是地球质心。
  3. 注意空间经过时间衍生后的变化：和的位置空间是同一空间，因此和是同一空间下的同一矢量。和的速度和加速度空间不是同一空间，相对地球速度空间和相对惯性速度空间，不在同一空间。
  4. 在同一空间中，一个矢量是确定的，可以在该空间的不同坐标系描述并相互转换。和是同一个矢量，都是指载体相对地球的速度，数值不同但一一对应，对应关心遵从刚体坐标系转换定理。
  5. 矢量进行运算时，算式中所有的矢量都必须转换到同一空间的同一坐标系。和在同一空间（随时间变化），同一坐标系。和在同一空间的不同坐标系。比力方程是表述比力信息和速度变化率关系的。

**比力方程的推导都是基于两点**：1）比力的定义，2）速度变化率的定义

1. 比力的定义

比力的定义都是一致的（为引力场加速度，不包括自转影响）：



1. 速度变化率定义

不管以惯性系、地固系还是地理系为参考系，捷联解算中要求描述的的速度均为相对地球的速度，要得到这个速度要求位置也以地固系为参考系：



注意：



因为矢量和在空间中虽然是同一个矢量，但在同一空间中的不同坐标系描述。由于和是同一空间中具有确定关系的两个坐标系，所以和之间有确定关系，所以和也有确定关系，当相对只有自转没有平移时可通过如下哥氏方程描述：



注意：



因此具有明确的物理意义，表示载体相对地球的速度；也具有名明确的物理意义，表示载体相对惯性系的速度；但不具有明确的物理意义，是为了计算引入的中间量。是指载体相对地球的位置矢量，在惯性系下进行描述和求导。的意义是载体相对地球系的速度，在惯性系下描述并求导，它既不表示载体在惯性系下的加速度（），也不表示载体相对地球的加速度（）。

1. 哥氏方程

认为地球质心在惯性系下是静止的时，即只考虑地球公转，不考虑地球自转，即相对只有转动没有平动。有如下关系：





#### 惯性系下的比力方程

任何坐标系下的速度和加速度描述的参考系都是，位置和速度都是在地球系下描述。关键的区别是：相对地球的加速度矢量要在所用参考系下描述。惯性系下相对地球速度和加速度的描述是：



参考系为惯性系时的比力方程推导，







得惯性参考系下的比力方程：



得惯性参考系下的速度方程



#### 地理系下的比力方程



#### 地固/世界系下的比力方程

任何坐标系下的速度和加速度描述的参考系都是，位置和速度都是在地球系下描述。关键的区别是：相对地球的加速度矢量要在所用参考系下描述。地固/世界系下相对地球速度和加速度的描述是：



参考系为地固/世界系时的比力方程推导，







得地固/世界系参考系下的比力方程：



得地固/世界系参考系下的速度方程





### 加速度定义

加速度为载体系b相对参考系n速度的变化率，总有：



当不方便求取时，可引入中间参考系r，利用间接求取加速度。

但需要注意如下关系并不总是成立的：



正确的关系为：



即增加了一项：由中间参考系相对基本参考系的转动与载体相对中间参考系的线运动耦合产生的“**科氏加速度**”。

### 由加速度定义理解比力方程

载体的绝对加速度以惯性系为参考系，以地球固连坐标系为中间参考系，建立如下绝对加速度方程：



得



由上式得到比力方程：



又



比力方程可化简为：



速度方程

解算时需要直接利用的是速度方程，即通过比力更新。

**（1）以地理系为导航系**时的速度方程的矢量形式为：



其中的高度通道不稳定，在进行误差分析时可将水平通道化简为如下形式：



**（2）以世界坐标系为导航系**时的速度方程的矢量形式为：





其中

解析粗对准

通过和求，再讲转化为欧拉角即可。

考虑到的测量精度比高，利用如下方程计算：



东北天坐标系中：





IMU的测量数据为和，静止时有：，不考虑向心加速度时。

解算得到的航向角为本体系y轴与地理北之间的夹角

## 平台失准角

P系：平台系

c系：计算机坐标系

w系：导航坐标系

平台失准角()：从w系到p系

角：从c系到p系（姿态误差L：由于陀螺漂移）

角：从p系到c系（经纬度误差）



赶脚世界系的时候：

* 确认师姐的模型/程序中，平台失准角的定义是从p系转动到r系

设平台失准角为（定义为从转到），则有





## 由真实轨迹推算近似IMU数据

输入：和。是世界坐标系下姿态角。

得到中间值：和。将中间值输入到轨迹发生器中即得到IMU数据。



（1）由计算



短距离时：



（2）计算微分的数值方法

因为输入的和只有10HZ的离散值，求微分时，取附近5个点进行2次多项式拟合，取拟合曲线的斜率为该点的微分值。

## 地球

### 地心纬度和地理纬度

地心纬度是指地心到该点矢量与赤道面夹角，地理纬度是指该点水平面法线与赤道面夹角。

### 地球表面一点的主曲率半径（以光衢书）

为地心纬度，为地球偏心率，为长半轴。当地子午面主曲率半径为：



当地与子午面相垂直大圆主曲率半径：



### 地球表面一点的主曲率半径（Titterton,Weston书）

为地心纬度，为地球偏心率，为长半轴。当地子午面主曲率半径和横向曲率半径为：



平均曲率半径，

### 地心至地表一点的直线距离R



### 重力加速度

重力加速度与高度的关系



根据地球椭球模型，在地表的重力加速度和地理纬度关系为：



### 大地系和地固系的转换

大地系指经纬高度表示相对地球位置，地固系表示直角坐标系表示相对地球位置。







## 零碎知识点

### 坐标变换

三维坐标变换有两种基本的理解方法：几何法和代数法

#### 几何法

三维坐标变换的几何描述较为复杂，往往将三维变换等效成1~3次二维变换。绕Z轴逆时针转角的二维几何变换的描述：



图 2二维几何变换图



即



#### 代数法

根据如下规律：



得，进行任何一个次三维坐标转换之后的坐标关系为：



#### （逆时针）





#### （逆时针）





#### （逆时针）





#### （顺时针）





#### 地球系->地理系

指向0度经线，指向自转轴

东北天地理坐标系：指向东，指向北，指向天

分两步实现：

1）：与重合

2）：OK

得



经度：[-180 180]，纬度：[-90 90]。不存在二值性问题

### 欧拉角<->方向余弦矩阵

任意一次三维坐标转换可以等效为三次二维旋转，这三次二维旋转角称为欧拉角。等效的方式有6种，只要前后两次的旋转轴属性不同即可实现。

姿态角是欧拉角的一种特例。姿态角的定义如下[引高钟毓（我改成东北天的形式）]：

参考系：地理系ENT

俯仰角（）——运载体纵轴与水平面之间的夹角，在垂直面中测量，抬头为正；(-pi/2~pi/2)

横滚角（）——运载体横轴与水平面之间的夹角，在横截面中测量，左边抬起为正；(-pi/2~pi/2)

航向角（）——运载体纵轴与北向轴之间的夹角，在水平面内测量，顺/逆时针为正；（-pi~pi）（0~2\*pi）



在东北天地理系左参考时，从地理系到本体系可等效为三次旋转：



航向角以逆时针为正时有：



对上式有：



的小角度形式:



其中为的斜对称矩阵（根据叉乘定义得到）：



注意的结果只在欧拉角的旋转顺序存储的是x、y、z的顺序。

航向角以顺时针为正时有：



对上式有：（仅航向角符号不同）



#### 姿态角变换率->角速度

轨迹发生器中直接给定的是姿态变化率

根据如下转动方法：



给定t时刻的转动时达到的姿态变化率为：，从b(t)系转动到b(t+1)系的过程为：



当计算周期足够短时，认为每一次转动的整个过程中以转动前的转动轴为轴，则有：



忽略从b(t)系转动到b(t+1)系之间的差别，则：



当姿态角以世界坐标系为参考时：



#### 航向角的多值问题

* 逆时针为正，[0 360]

首先注意输入的是，航向角的顺逆定义与无关。

先计算基本值，逆时针为正时：。顺时针为正时：。

然后区间分布如下：





### 欧拉角微分方程

对于从b系到t系的欧拉角、、：

从转动关系可得：



从转动的角速度可得到欧拉角微分方程。



对上式求逆即可得欧拉角微分方程



常用于飞行力学的姿态计算，不用于捷联惯导：（1）存在奇点°（2）三角函数要用级数展开，计算量大

### 方向余弦矩阵微分方程

（《惯性导航原理》以光衢，80~81）



（1）9个参数求解

（2）运算，计算量小

（3）无奇点

（4）歪斜误差：不是严格的正交矩阵，正交误差修正算法需要做迭代计算（不适用于捷联解算）

方向余弦矩阵微分方程的推导

结论：



**证明：**

随时间变化率：



将写成如下形式：

****

设从转到转动的角度为，则有





定义



则有



定义





得最终形式



### 向量乘

向量乘可转换为矩阵形式：



所以：







向量叉乘不满足结合律，且不满足交换律。

### 四元数

《高钟毓P16》

#### （1）四元数定义



几何意义表示绕矢量转动。单位化时即转动。很多地方的定义直接要求单位化。

三角表示（单位化后）：



几何意义表示绕转动角。

**共轭四元数：**



**模方：**



单位四元数：N=1。另有：



**逆：**



#### （2）四元数乘法



后两行为四元数乘法的两种矩阵形式。

四元数乘法不满足交换率(旋转顺序不可逆)，满足结合率。

#### （3）四元数微分方程

载体系：b，导航系:n。四元数表示从n->b。

四元数微分方程有两种形式：



（1）第一种形式是捷联惯导解算中可以采用的



上式的角增量解算方法：





1至4阶级数展开微分方程解为：

时简化为一阶角增量方程









#### （4）四元数表示转动



以上四元数Q表示同一坐标系下矢量R到P的转动，即矢量R 绕转动（逆时针为正）即得到矢量P。与方向余弦矩阵的定义不同，这里是坐标系不动，矢量转动。将矢量扩展为四元数：最前一位加0。



由上述四元数描述矢量旋转的关系，可得到四元数描述坐标系转动的关系。



四元数Q表示：坐标系a中，将R转动到P；也可以表示将a的坐标轴转动到b坐标轴。因此有：



得到任一矢量P在a和b坐标系下的转换关系，当Q为单位四元数时得到转动的计算形式：



**四元数表示连续转动：**



注意，旋转矩阵表示连续转动是在左边继续乘以新的矩阵，而四元数表示连续转动则是在右边继续乘以新的四元数。因为在的左边，而在的右边。



**四元数转动的矩阵形式：**

对于：



有：



#### （5）四元数->方向余弦矩阵

将四元数转动的四元数乘法转为矩阵形式即可得到方向余弦矩阵（四元数为单位四元数）（）：





由方向余弦矩阵求四元数（注意《以光衢P84》是错了一个符号，这种方法只利用对角线三个元素）。另一种做法：以下是《高钟毓P17》的，



#### （6）欧拉角->四元数

姿态欧拉角均以逆时针为正：



得



以上存在一个问题：Q1中k是t系的、Q2中i时中间系的、Q3中j是b系的，为什么能直接相乘？我猜是否是因为四元数的直接原理是转动矢量而不是坐标系？

### 小角度时 四元数 与 欧拉角的关系

#### （1）直接根据 得到

为小角度时：



#### （2）从方向余玄矩阵得到













### 四阶龙格-库塔法



则





### 常用常量

#### 地球

Wie=7.292115147e-5;

Re = 6378245 ;

e = 1/298.3 ;

%计算地球半径

Rxt = Re\*(1+e\*sin(lat(i))^2) ; %卯酉圈主曲率半径

Ryt = Re\*(1-e\*(2-3\*sin(lat(i))^2)) ; %子午圈主曲率半径

%计算重力加速度

g0=9.7803267714;

gk1=0.00193185138639;

gk2=0.00669437999013;

temp=sin(lat(i));

g=g0\*(1+gk1\*temp^2)\*(1-2\*hight(i)/Re)/sqrt(1-gk2\*temp^2);

#### 月球

引力常数：4.9028e3; 平均轨道半径：3.8440e5 km 平均赤道半径：1737.5 km

表面引力加速度 1.624 m/s^2

# 视觉导航

## 导航坐标系

w:世界坐标系，初始时刻地理系。在参考点，0位置0姿态时，相对载体，xw向初始东，yw向初始北,zw向初始天。

b:本体系，在当前时刻，相对载体，xb向右，yb向前,zb向上。

:左摄像机坐标系，当前时刻，相对左相机，向右，向下，向前。

:右摄像机坐标系。

导航时以为基准，因此默认为。

左（右）成像平面坐标系：原点在图片左上角，X向右，Y向下。

#### Tcb\_c

Kitti的



月球车：



#### Rbc

IMU坐标系（与本体系b重合）与摄像机坐标系之间的安装矩阵为。

安装角为0时，从b绕x轴顺时针旋转90度即为c：。

相机的安装角为（俯仰、横滚、偏航）的定义：以本体系b为参考系，转动欧拉角得到b1，从b1绕x轴顺时针旋转90度即为c：





#### 左右摄像机坐标系

导航系统中与张正友的标定工具箱中一致，采用：



好可表示为



所以有，B为基线距离

## 视景仿真软件相关

### 三维重建参数的获取

由像元像素尺寸表示的焦距fc=f/pixelSzie，通过视场角和分辨率求得。软件中设置的视场角为水平方向视场角，垂直方向的视场角可由分辨率比率求得。

### 软件导入采样点格式

x向右，y向上，z向前

俯仰/倾斜/偏航

### 由真实轨迹到视景仿真采样点

S:视景仿真坐标系

ca：摄像机在本体系中的姿态系（不是摄像机的导航坐标系）

真实轨迹输出为本体系相对导航系（初始时刻地理系）的位置和姿态：和。

视景仿真软件中需要得到的是左相机相对视景仿真导航系的位置和姿态：和。





但注意转换为欧拉角时，输入到视景软件中是：航向、俯仰、倾斜（导航系统中顺序是：俯仰、倾斜、航向）。

由于视景仿真软件中的位置顺序不同

（xs=xw ys=zw zs=yw）：



当安装角均为0时 ：



相机的安装角为（相机系相对本体系：俯仰、横滚、航向），则：



## 组合导航中视觉输出

导航程序中，输出：

Rcc(k)：k时刻的本体系到k+1时刻的本体系的旋转矩阵

Tcc(k)：k时刻的本体系到k+1时刻的本体系的平移矩阵，在VNS解算的k+1本体系下进行描述



注意：视觉输出的Tcc在是在视觉导航的本体系下进行描述的。惯性解算中直接得到的Tbb是在世界坐标系中进行描述的。为了能够进行减法运算，将视觉的Tcc转换到世界坐标系中：



## 运动解算：从特征点到Rbb、Tbb，再到位置、姿态

### 三维重建

#### 平行双目



### 相对运动估计

三维重建得到：特征点集在k-1时刻摄像机坐标系的坐标，和相同特征点集在k时刻摄像机坐标系的坐标。设特征点为d，则有：



是到的转移矩阵，是在到的平移矢量在坐标系下的表达，反映和的测量误差。

：



通过解线性方程组可得到视觉的最终直接输出量测和。



### 运动积分

以世界坐标系为导航系，位置为，姿态矩阵为，运动积分公式：



### 运动积分误差分析

## Tbb定义

* 师姐论文公式23（原师姐的表述）**错误**：



正确的形式：



对应的纯视觉导航位置更新公式：



**欧氏空间的刚体变换**

r系到系的旋转矩阵为，平移矩阵为，则空间中某一点（在空间中位置不变）在b系的坐标和在r系的坐标之间的关系为：



将平移前原点坐标（r系原点）代入式中可得：



即等于平移前坐标系(r)原点在平移后坐标系(b)中的坐标，如果沿原坐标系y轴正方向平移1个单位，则，而不是。

## 从真实轨迹得到Rbb、Tbb（独立的视觉输出）



## Rbb和Cbb与Rcc和Tcc的关系





## IMU坐标系与摄像机坐标系之间的安装矩阵问题

把有安装矩阵时的代入下式即可。



## Rbc（无安装角时）

b本体系：y向前，z向上，x向右

c摄像机坐标系：y向右，x向下，z向前

两个坐标系的x轴重合，从b系，绕x轴转-90即为c系：



## 运动积分

输入：

1）**：从到的转移矩阵

2）：在系下，从到的平移矢量

计算：



**证明：**

运动积分的问题总结为：由、、、，求。

其中为k时刻本体系的原点在参考系的坐标。







又



得



同时也证明了：



## 成像面坐标系与图片存储格式

导航的成像面坐标系为:X=水平方向，Y=竖直方向，原点在图片左上方。X、Y的方向是为了与摄像机坐标系对应，方便成像坐标到摄像机坐标的转换。

分辨率：X\_pixelN \* Y\_pixelN

二维灰度图片的存储格式：列为Y，行为X，数组大小为 Y\_pixelN\* X\_pixelN，图片大小为X\_pixelN \* Y\_pixelN

# Geiger, Andreas 的 libviso2

（1）p = reconstructionMex('getpoints');输出 摄像机系 下的特征点三维坐标

特征点的摄像机系位置大概范围：x向右[-15 15]，y向下[0.35 -3.5],z向前[5.7 22]

## 运动积分

注意《Visual Odometry based on Stereo Image Sequences with RANSAC-based Outlier Rejection Scheme》geiger 文中的世界坐标系是前一时刻的摄像机坐标系，和我通用的定义不一样。所以Tr的初值是eye(4)。

* + 1. Tr = visualOdometryStereoMex('process',I1,I2);
    2. Tr\_total{k} = Tr\_total{k-1}\*inv(Tr);

设世界系为，当前时刻摄相机系为，前一时刻的摄像机系为。

相机中心在世界系中的位置分别为和，姿态分别为和。

令



则









1. Tr = visualOdometryStereoMex('process',I1,I2);输出的是







1. 运动积分：Tr\_total{k} = Tr\_total{k-1}\*inv(Tr);输出的是。其中即相机在世界系（初始摄像机系）的位置，为相机相对世界系的姿态。

### 运动转换：从初始时刻摄像机系到世界系（我的定义）

初始时刻的摄像机系（（first））下的位置为，姿态矩阵为。

则



其中



本体系在世界坐标系下的位置：



# 组合导航

## 状态模型模型

### （1）采用直接状态模型时，状态量为：





### （2）采用间接状态模型时，状态量为：



视为常值：





* 惯导误差的理解

**惯导误差=SINS解算值-真实值**

因此，利用k\_int到k\_int+1估计出误差值后，这个误差表示纯SINS递推得到的k+1时刻轨迹的误差，因此这个误差应该用来补偿k+1时刻的SINS递推结果。

滤波估计得到：、、。SINS递推到k+1时刻得到：、、。

滤波估计所得误差的意义：

，



表示从SINS解算得到的k+1时刻导航系转动到k+1时刻真实导航系的欧拉角。当计算准确时，，即计算机导航系c。滤波结果则为：



，，。

则补偿方法为：

，， 

## 量测量和量测模型

### 量测一：QbbTbb

量测量为和，这是最直接的量测量，只是将姿态转移矩阵转换为四元数形式：



量测方程为：



这是一个非线性的量测方程。

量测方程为：

### 量测二：dQdT









量测方程：



量测量：



注：INS相关量测的计算：k-1时刻用上一时刻的滤波估计值，k时刻用还未补偿的SINS递推值。



注：计算VNS相关量测：从k-1时刻到k时刻的相对运动信息。



猜想拓展：







**量测量为，是在前一刻的本体系下的表达。**

* 例：imu\_fre=100HZ，vns\_fre=1HZ。

第1次滤波：imu\_num=100,利用“补偿好的（不需要补偿的）”P\_SINS(1)SINS递推得到了P\_SINS(101)。

载入视觉量测：从t=1s到t=2s的相对运动信息

计算一步预测状态：用fb(1)，X中除了常值漂移都是0

计算量测预测：从P\_SINS(1)的初始轨迹到SINS预测的轨迹P\_SINS(101)的相对运动

状态估计X\_new

把状态估计结果补偿到导航轨迹中：用X\_new补偿P\_SINS(101)，并赋给P\_INT(2)

* 采用惯导增广误差模型作为状态模型



### 量测四：dRTb

## 宁-量测量和量测模型





前提：



### 量测三：dRdT













**量测量为，是在导航系下的表达。**

# 实验参数

## 勇气号、机遇号：

**[]**Two years of visual odometry on the mars exploration rovers

[]Mars Exploration Rover Engineering Cameras

导航相机分辨率:256x256，视场角45度，相机高1.5m。MER的IMU:1°/h，0.2mg.

单步视觉导航位置误差小于2mm。

一次运动一般保证相邻图片有60%以上的重叠区域，每一次相邻运动命令，一般控制前进直线距离或弧线长度不超过75cm，航向角变化不超过18度

一次视觉导航计算需要大约3min

匹配成功特征点个数：80个左右

[]勇气号与机遇号火星车定位方法评述，邸凯昌，航天器工程，2009，18(5)

[] NASA ( National Aeronautics and Space Administra2tion)1 Mars exploration rover landings p ress kit [ EB/OL ]. (2004201) 1 http :/ / marsrovers1jpl1 nasa1 gov/ newsroom/ merlandings1pdf1

相机杆上的导航相机Navcam (Navigation Camera)是一对全色相机,相机分辨率1024x1024,立体基线长20 cm（[[1](#_ENREF_1)]P5） ,高约1.5m（[[1](#_ENREF_1)]P18）,视场角45°，相机主距 14.167 mm

火星车在平坦坚硬的地面上盲行驶的最高速度为5 cm/ s ,在自主行驶模式下的速度约

为 1 cm/ s 。

## 好奇号：

1024x1024

好奇号相机参数与勇气号/机遇号相同（[[2](#_ENREF_2)]P22）

[]Mars Science Laboratory mission and science investigation

140m/h（38.8889 mm/s）盲行，45m/h避障，20m/h（5.6 mm/s）视觉导航避障

## 玉兔号：

文献（吴伟仁，周建亮. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术，信息科学，2014，44（4））中的实验参数（推测玉兔号的参数应该也是这个）：基线约270cm,高度约1.65m,图像大小为1024x1024

## 我的实验视觉参数：

相机：基线20cm，分辨率1024x1024，视场角45度

## 轨迹1：匀速圆周10min

向前0.03m/s，转向0.02°/h，10min时间，前进约18m，转向12度。

视觉采样0.1HZ（约30cm采集一对图），基线距离20cm，分辨率1024x1024，相机安装角俯视10度

## 轨迹2：

y方向0.03m/s，x方向幅值为0.005m/s的正弦，1h时间，前进约108m。

视觉采样0.1HZ（约30cm采集一对图），基线距离20cm，分辨率1024x1024，相机安装角俯视10度

# 程序结构

## 数据关系（适用于各种组合导航方法）

* 轨迹发生器

运行时间：runtime\_sec =62 sec;

惯导频率：Imu\_fre=100HZ：

真实轨迹数据个数：true\_n=runtime\_sec\* Imu\_fre+1=6201;

Imu数据个数：imu\_n= true\_n-1=6200;

输出：1>（3, true\_n）（3,6201）position\_r,attitude\_r,velocity\_r

2>（3, imu\_n）（3,6200）f\_IMU,wib\_IMU,acc\_r



* 仿真生成RT

视觉数据频率：vns\_fre=1HZ;

RbbTbb个数：RT\_n= fix(imu\_n\*vns\_fre/imu\_fre)=62;

视觉轨迹数据个数：visual\_n=fix(imu\_n\*vns\_fre/imu\_fre)+1= RT\_n +1=62+1;

输出：1>（3,3, RT\_n）（3,3,62）Rbb,Tbb

视觉导航输出：（3，RT\_n）VOsta,VOpos,VOvel



* 组合

Int\_fre=vns\_fre=1HZ;

Int\_n= visual\_n=fix(imu\_n\*vns\_fre/imu\_fre)+1=63;

输出：1>（3, Int\_n）（3,6201）INTGpos，INTGatt，INTGvel，

## 程序流程：

关键要义：

* 状态预测

### 惯导力学方程-QbbTbb量测



### 惯导误差方程-subQbbsubTbb量测

Imu\_fre=100HZ,vns\_fre=1HZ

**（1）第1次滤波**：imu\_n=100，完成了如下功能：



更新了组合导航的轨迹：

状态用于补偿后进行重置

且使

完成以上后则进入（1.5）纯捷联解算过程->

**（1.5）1~2次滤波之间的捷联解算过程**

* Imu\_n=101





**（2）第2次滤波**：imu\_n=200（完成SINS递推之后进入此流程）



1. 滤波参数准备：需要代入滤波函数的变量



1. 状态预测



1. 量测量

代入：



**INS相关**



**VNS相关**





**得到量测量**



1. 状态估计







提取误差估计：

1. 用状态补偿轨迹









1. 状态重置



# 程序调试方法

## 组合导航滤波调试方法：

* 量测的精度和导航算法的正确与否单独调试：先将RINS,TINS,RVNS,TVNS保存起来查看；
* 对于惯性/视觉的组合导航方法，分别将惯性和视觉的量测置为标准值，看是否能够修正里一个的误差。
* 将状态的初始值置为期望值，此时一步状态预测如不是真值说明Fai阵错误。
* 保存并观察量测信息 观察Z-error的符号，如不能修正状态则量测方程有误

# 师姐结题答辩旁听笔记

* （钟）论文中论述研究内容方法时要有引言，充分说明研究意义，所研究方法能达到的理论和现有精度
* （钟）论文题为“导航方法研究”但却只用了EKF，实际上是建模研究。论文题说法是否有问题？
* （钟）参考文献必须有当年的（2014），不然可以直接毙掉（包括投稿时）
* （全）深组合浅组合的概念问题：原本定义是通过状态量出发的，对像信息是可以被估计出来的。先通过量测的角度出发叫深浅组合是否有问题？如果能将视觉信息加到状态量中叫深浅组合时是稳妥的
* （胡）不同曲线通过颜色区分时有问题，打印后不具有辨别性
* （楚）为了使得图形的可读性更好，要注意将曲线图的纵坐标范围进行限制
* （我）PPT中以方法1、2…6来区分很不直观
* （钟）论文格式不合格问题很严重。特别是答辩的时候如果评审老师不是相关领域的，会特别关注论文的格式是否规范，问题严重时导致印象特别差，而且没有时间去展示成果。
* （我）答辩时，如果评审老师非相关专业，一般难以问出相关核心技术问题。实际上提出的问题一般是：<1>通用性概念的说法问题，<2>格式问题，<3>研究内容的系统性问题，<4>理论研究比例，此评委组中工作量对学硕的认可度不大
* （钟）谨慎命名自己的新方法。特别是将一现有方法应用到某个特定领域时，就将这种方法给一个新的命名不太妥当
* （李）“玉兔号”用的什么方法，他们觉得我们应该知道
* （钟）章节的分布不能勉强，答辩时会重点扫阅目录。写毕业论文的时候不能按照研究的过程安排章节，要重新按照研究内容进行规划，不能太偷懒。
* 摘要必须仔仔细细，其中不要含定性的描述。

# 论文

（1）Measurement Science and Technology,ID:baixinbeibuaa,password:abc456mn

[1] MAKI J, BELL J, HERKENHOFF K, et al. Mars exploration rover engineering cameras [J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012), 2003, 108(E12):

[2] GROTZINGER J P, CRISP J, VASAVADA A R, et al. Mars Science Laboratory mission and science investigation [J]. Space science reviews, 2012, 170(1-4): 5-56.